

ЛАБОРАТОРНАЯ
ТЕХНИКА

УДК 537.312.6

КРИОГЕННЫЙ КОАКСИАЛЬНЫЙ КАБЕЛЬ

©2026 г. М. А. Маркина^{a,b}, А. А. Ломоносов^{a,c}, М. А. Тарасов^{a,*},
В. С. Эдельман^d

^a *Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук
Россия, 125009, Москва, Моховая, 11, стр. 7*

^b *Национальный исследовательский университет “Высшая школа экономики”
Россия, 101000, Москва, Мясницкая, 20*

^c *Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
Россия, 141700, Долгопрудный Московской обл., Институтский пер., 9*

^d *Институт физических проблем им. П.Л. Капицы Российской академии наук
Россия, 119334, Москва, ул. Косыгина, 2*

*E-mail: tarasov@hitech.cplire.ru

Поступила в редакцию 15.09.2026

После доработки 22.09.2026

Принята к публикации 23.09.2026

В лабораторных условиях изготовлены коаксиальные кабели для исследований при субкельвиновых температурах с затуханием сигнала в кабеле длиной 30 см не более 5 дБ в диапазоне частот ниже примерно 5.5 ГГц и притоком тепла к образцу на уровне пиковатт.

Ключевые слова: коаксиальные кабели, потери в кабелях, сверхпроводящие линии, теплоприток по кабелям

При проведении исследований в области гигагерцевых частот при температурах ниже 1 К для связи с измерительной аппаратурой требуются коаксиальные кабели с умеренным затуханием зондирующего сигнала и при этом с весьма малым потоком тепла из комнаты к образцам. Особенно жесткие требования возникают, если речь идет о криостатах, обеспечивающих охлаждение до температур 0.1 К и ниже. Существуют промышленные образцы кабелей для низкотемпературных применений, например, производства GVL Cryoengineering GmbH [1]. Это кабели с латунной центральной жилой с сопротивлением 8.1

Ом/м, оплеткой в виде чулка из мельхиора с сопротивлением 5.5 Ом/м, тефлоновой изоляцией и с потерями около 5дБ/м. Согласно закону Видемана–Франца, поток тепла W от теплого конца с температурой T_1 к холодному с температурой T_2 равен

$$W \sim 2.5 \cdot 10^{-8} (T_1^2 - T_2^2)/R.$$

Тогда для такого кабеля с разумной длиной около 30 см получим при $T_1 = 293$ К (комнатная температура) и T_2 , равной, например 4 К, поток тепла, составляющий примерно 1 мВт. Это ничтожно мало по сравнению с производительностью современных “сухих” рефрижераторов типа импульсной трубы или Гиффорда–МакМагона, составляющих порядка 1 Вт при температуре 4К. При $T_1 = 4$ К и $T_2 = 0.1$ К поток тепла по центральной жиле равен 0.16 мкВт и по оплетке составляет 0.25 мкВт. Эта допустимая нагрузка для, например, микрокриостата растворения [2], но неприемлемо для потока по центральной жиле к исследуемому образцу. Например, даже мощность около 1 нВт, подводимая к микроструктуре сверхпроводник–изолятор–нормальный металл, используемой в качестве приемника субмиллиметрового излучения, приводит к ее недопустимому перегреву [3].

При субкельвиновых температурах у промышленных кабелей с внешней оплеткой между нею и центральной жилой практически отсутствует теплообмен. И если поток тепла по оплетке можно снять с помощью теплопроводов с передачей тепла на промежуточные уровни температуры, например на испаритель в криостате растворения с температурой около 0.7 К и непосредственно на камеру растворения до подключения к образцу, то от внутренней жилы тепло на оплетку с ее слабым механическим контактом с тефлоновой изоляцией не отводится.

Чтобы решить задачу, мы изготовили в лабораторных условиях коаксиальные кабели с наружным экраном из мельхиоровой трубки $\varnothing 1.4 \times 0.2$ мм² и провода диаметром 0.35 мм из NbTi жилы диаметром 0.25 мм в медной матрице с лаковой изоляцией. Ключевой задачей при изготовлении коаксиальной линии являлось центрирование сверхпроводящей жилы в отрезке трубки требуемой длины. Для этого на отрезке провода с достаточной длиной механически скальпелем удалялся лак с одной стороны на длине примерно на 1 см короче трубки так, чтобы с обоих концов лак оставался не поврежденным. Затем в азотной кислоте стравливалась медь на этом участке.

На оголившийся сверхпроводник с одной стороны нанизывались с интервалом примерно 10 мм отрезки термоусадочной трубки длиной 4–5 мм. С противоположной стороны провод вдевался в отрезок трубки и сборка натягивалась горизонтально как струна. Термоусадочные трубки подбирались такими, чтобы при нагреве они плотно облегли сверхпроводник, а внешний диаметр становился равным примерно 0.8 мм. Для более надежной фиксации термотрубок на места их посадки наносились капельки эпоксиды Stycast

1266. После полимеризации эпоксида на эту часть жилы надвигалась трубка из мельхиора. Чтобы избежать зацепления за центрирующие элементы торец трубки предварительно расширялся на 0.1–0.2 мм с помощью стержня со сточенным на конус торцом.

При надвигании трубки зазор между ней и жилой заполнялся эпоксидом Stycast 2850 FT, наносимым как непосредственно на центральную жилу, так и в прикраевую область внешней трубки для исключения образования пустот. После завершения процесса изготовления изделие выдерживалось до полной полимеризации эпоксида. В завершение выступающие концы жилы в медной матрице обрезались до размера, обеспечивающего пайку с элементами высокочастотных разъемов.

Были изготовлены коаксиалы разной длины – от 10 до 30 см (рис.1). Благодаря их малому диаметру и термовставкам их можно изгибать, если это требуется конструкцией рефрижератора.

Рис. 1. Образцы изготовленных коаксиалов с разъемами SMA.

На рис. 2 приведены результаты измерения потерь в тракте из коаксиалов, установленных в криостате на базе рефрижератора Гиффорда–МакМагона. От разъема при комнатной температуре до двух проходных разъемов на второй ступени рефрижератора Гиффорда–МакМагона идут коммерческие коаксиалы из нержавеющей стали с тефлоновой изоляцией. С другой стороны разъемов установлены два изготовленных нами коаксиала длиной по 30 см, замкнутые между собой проходным разъемом.

Рис. 2. Прохождение сигнала через весь тракт при комнатной температуре

На рис. 3 показано прохождение, выделенное для двух последовательно включенных изготовленных коаксиалов. По сравнению с результатами при комнатной температуре оно возрастает на порядок при охлаждении. Улучшение связано, в первую очередь, со сверхпроводимостью центральной жилы. Потери при частотах ниже примерно 5.7 ГГц находятся в пределах 5 дБ с провалами до 10 дБ. Причины кроются в недостаточном согласовании тракта и потерь в мельхиоре. При стремлении к частоте 6 ГГц потери резко нарастают до 20 дБ. Возможно, это связано с тем, что половина длины волны становится близка к периоду структуры из чередующихся участков термоусадки и эпоксиды.

Рис. 3. Прохождение сигнала через два изготовленных коаксиала длиной по 30 см ...

Оценим притоки тепла по центральной жиле в зону с температурой 0.1 К от криостата растворения. Используем результаты по теплопроводности провода NbTi: $k = 150T^2$ мкВ/см·К² и для Stycast 2850 FT: $92T^{2.65}$ мкВ/см·К^{2.65} [4]. Будем считать, что коаксиальный кабель длиной 30 см идет от разъема на уровне температуры 4.2 К (жидкий гелий) к измеряемому образцу, охлаждаемому криостатом растворения с температурой 0.1 К. Снаружи мельхиоровой оболочки посередине кабеля и на расстоянии 2 см от миксера

напаяны теплопроводы, идущие к испарителю и к миксеру. При оценке перепада температур между центральной жилой и теплопроводом тепло снимается через эпоксид в зоне длиной 1 см. В результате поток к испарителю при температуре 0.7 К равен примерно 0.1 мВт, перепад температур составляет 1 мК. Поток от испарителя к миксеру равен 1 нВт, перепад температуры составляет 3 мК, а поток к образцу равен 0.5 пВт.

По мельхиоровой оболочке поток тепла к миксеру находится на уровне 0.1 мВт. Однако его можно отвести непосредственно на камеру растворения и снизить суммарный поток к измеряемому образцу по оболочке до примерно 1 нВт. И это не предел – известно, что в криостатах растворения вдоль теплообменника температура изменяется от температуры миксера до температуры испарителя, и ставя “перехваты” потока тепла вдоль него можно снизить приток к образцу еще на несколько порядков.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания ИФП РАН и при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (грант 075-15-2024-482).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Thermal resistance of low temperature cables, GVL Cryoengineering GMBH.
GVL-CRYO@T-online.de
2. Марухно А.С., Эдельман В.С. ПТЭ. 2024. № 5. С. 214.
<https://elibrary.ru/item.asp?id=80453886>
3. Лемзяков С.А., Тарасов М.А., Эдельман В.С. УФН. 2025. Т. 195. № 7. С. 759
<https://doi.org/10.3367/UFNr.2024.12.039844>
4. Olson J.R. Cryogenics. 1993. V. 33. № 7. P. 728.
[https://doi.org/10.1016/0011-2275\(93\)90027-L](https://doi.org/10.1016/0011-2275(93)90027-L)

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис. 1. Образцы изготовленных коаксиалов с разъемами SMA

Рис. 2. Прохождение сигнала через весь тракт при комнатной температуре (1), при $T = 2.5$ К (2), для закороченных коммерческих коаксиалов (3), для закороченного выхода на вход измерительного прибора (4)

Рис. 3. Прохождение сигнала через два изготовленных коаксиала длиной по 30 см при комнатной температуре (1) и при 2.5 К (2)

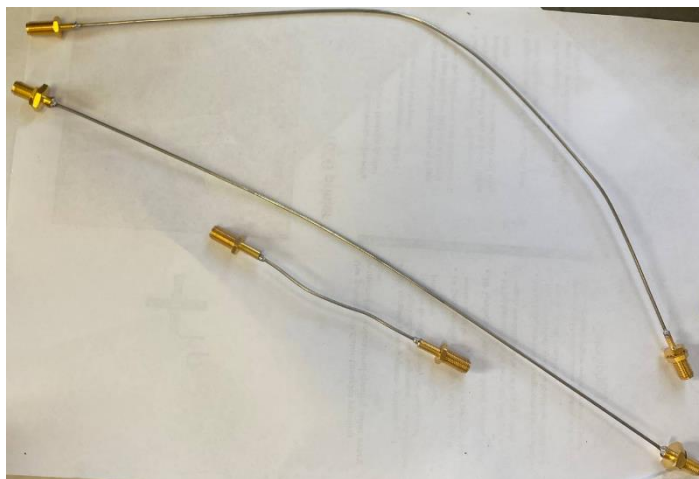


Рис. 1.

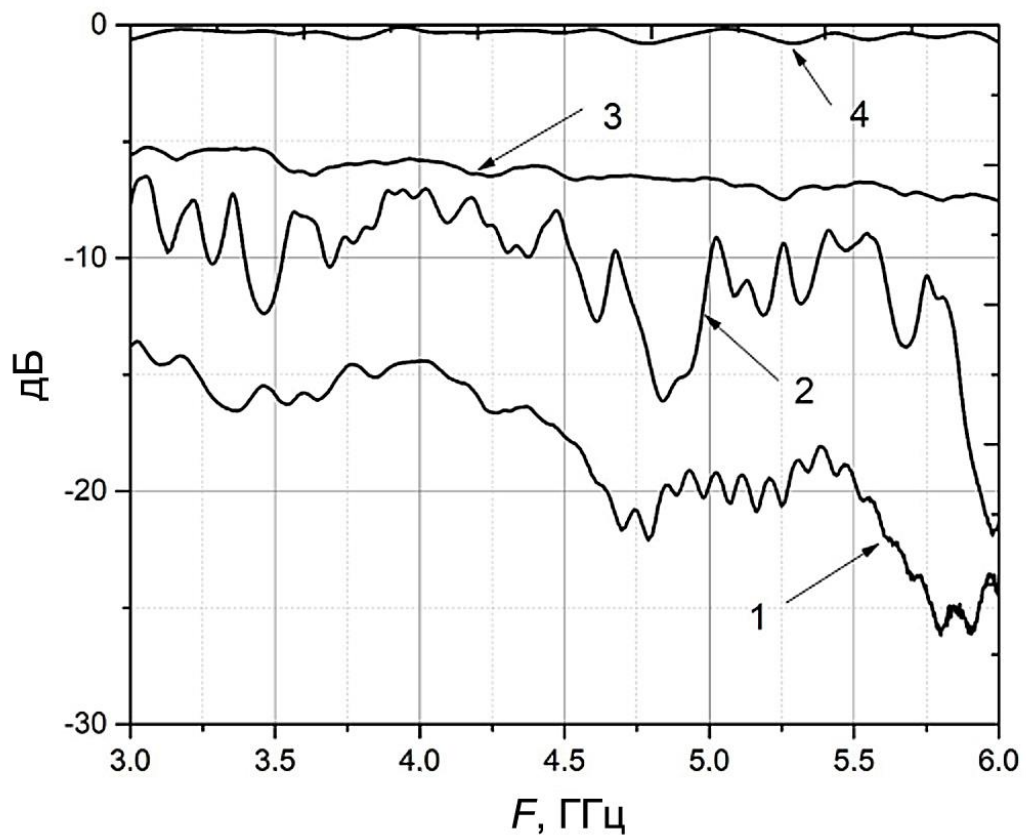


Рис. 2.

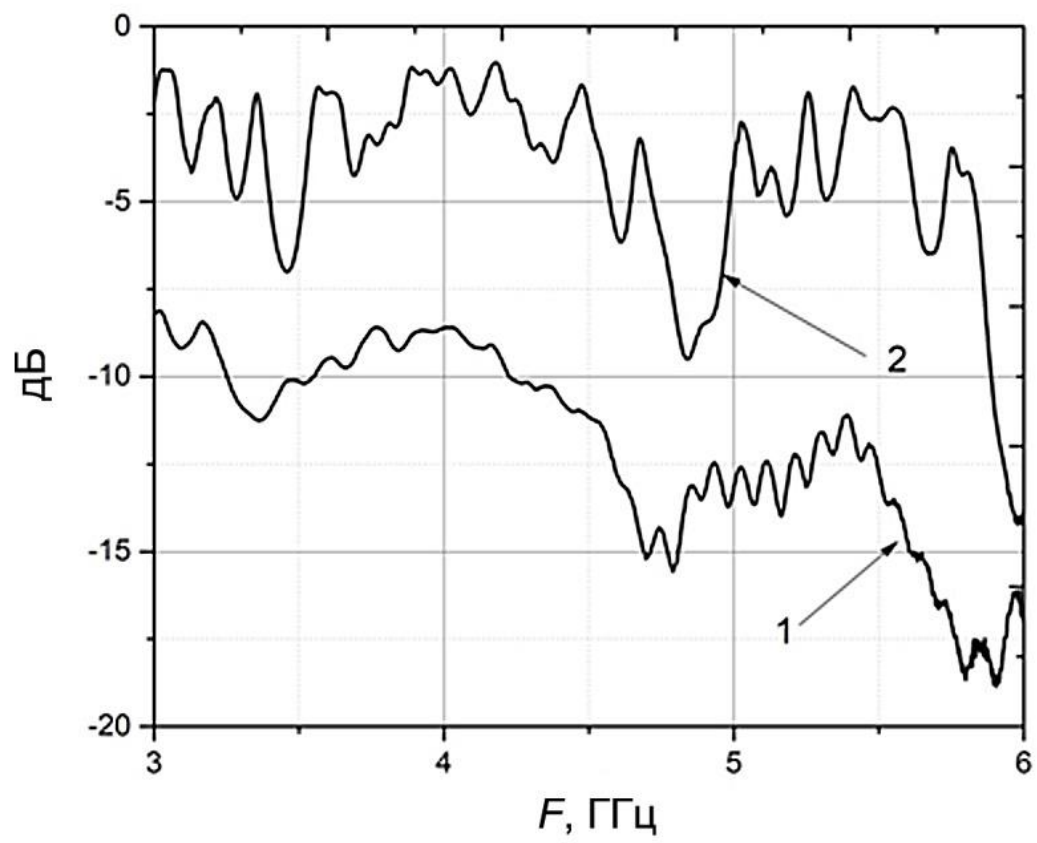


Рис. 3.